E/CONF.39/A/113
15 Oct.1962
ORIGINAL : FRANCAIS

CONFÉRENCE DES NATIONS UNIES
SUR L'APPLICATION DE LA SCIENCE ET DE LA TECHNIQUE
DANS L'INTÉRÊT DES RÉGIONS PEU DÉVELOPPÉES

Point de l'ordre du jour : A. 3. 2. 3

Portugal

NOUVELLES PERSPECTIVES DANS LE PROJET ET LA CONSTRUCTION DE BARRAGES ECONOMIQUES EN BETON

Par J. Laginha SERAFIM,
Chef du Service de Barrages
du Laboratorio Nacional de Engenharia Civil

Les mémoires rédigés à l'intention de la Conférence des Nations Unies sur l'application de la science et de la technique dans l'intérêt des régions peu développées sont des documents de travail. Ils sont publiés tels qu'ils ont été présentés et les assertions et opinions qu'ils contiennent sont celles de leurs auteurs.

NOTES

1. Les mémoires choisis pour être présentés en séance générale pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

2. Les mémoires choisis pour être présentés en séance spéciale pourront être obtenus à la Conférence dans l'une seulement de ces langues officielles.

3. Les résumés qui ont été rédigés pour tous les mémoires par les auteurs de ceux-ci pourront être obtenus à la Conférence dans les langues officielles suivantes des Nations Unies: anglais, espagnol, français et russe.

4. Préalablement à la Conférence, les mémoires et les résumés ne feront pas l'objet d'une distribution générale mais d'un tirage restreint destiné aux délégations des gouvernements et autres participants officiels. La publication et la distribution générale des actes de la Conférence s'effectueront conformément aux règles et pratiques agréées par le Comité des publications des Nations Unies.

NOUVELLES PERSPECTIVES DANS LE PROJET ET LA CONSTRUCTION DE BARRAGES ECONOMIQUES EN BETON

par J. Laginha Serafim
Chef du Service de Barrages du
Laboratorio Nacional de Engenharia Civil

1. INTRODUCTION. L'eau est un élément fondamental dans le progrès urbaniste, industriel et agricole des sociétés. L'aménagement rationnel des ressources hydrauliques ainsi que l'économie de l'eau sont considérés des objectifs prioritaires en des régions économiquement sous-développées, d'autant plus que le manque de ce produit vital s'y fait le plus sentir. La construction de barrages de retenue selon les principes les plus perfectionnés de la technique, obéissant à des critères de sécurité et économie, pose au génie civil des problèmes du plus grand intérêt.

Le choix des emplacements des barrages et celui des matériaux de construction, l'appréciation des caractéristiques et propriétés des fondations, le dimensionnement du barrage - sa forme, épaisseur, détails d'exécution - l'emplacement et les dimensions des organes évacuateurs des crues, l'observation permanente du comportement et sécurité de l'ouvrage après son achèvement, ne peuvent être résolus que par l'étude et la recherche portés sur chaque cas particulier. On peut prétendre, par conséquent, que la construction de grands barrages de retenue est un des facteurs déterminatifs de la création et maintien de grandes institutions de recherche dans le génie civil.

En général, lorsque les fondations sont en terre ou en roches peu compactes, les barrages seront en terre ou en enrochements, ce qui exige la présence de terre ou de rocher de qualité adéquate dans les environs. Lorsque les fondations sont en roche, et on peut disposer de ciment, les barrages en béton sont les plus économiques. Alors, on peut employer une grande quantité de main-d'oeuvre locale et développer bien des techniques du génie civil nécessaires à d'autres ouvrages en béton, tels que des ponts, grands bâtiments, etc. Le problème de la dérivation du cours d'eau pour la construction du barrage et celui de l'évacuation des crues sont ici résolus plus aisément que dans le cas de barrages en terre ou en enrochements, vu que l'ouvrage peut être franchi par l'eau sans danger.

Jadis, le type le plus courant de barrage en béton c'était le barrage poids massif où la poussée de l'eau était compensée par le poids de la structure à laquelle on donnait parfois une forme courbe en plan, ce qui permettait de réduire les épaisseurs. Toutefois le progrès des sciences de l'ingénieur et, en particulier, celui des méthodes expérimentales a conduit au perfectionnement des types traditionnaux de barrages et au développement de nouveaux types. De ce fait, les barrages poids sont remplacés très avantageusement du point de vue économique, par les barrages à contreforts, spécialement de tête massive et jumelés. Quant les vallées ne sont pas excessivement larges, l'usage s'est répandu de barrages à voûte unique et petite épaisseur, qui peuvent céder le pas à des barrages à voûtes multiples lorsque les vallées sont larges.

En particulier, les types de barrages où l'on fait usage de la voûte traduisent l'existence de techniques perfectionnées de dimensionnement, de recherche et de construction; en plus, ils présentent des avantages remarquables quant à la sécurité et à l'économie. En effet, les barrages voûtes offrent une marge de sécurité bien plus étendue que celle des barrages poids et l'économie dans le volume de béton peut arriver jusqu'à 75 %.

Dans cette communication, après un bref aperçu des travaux de recherche en cours dans le domaine des barrages qui concernant directement leur dimensionnement, on présentera les nouvelles tendances qui se dessinent dans le projet et construction de barrages-voûtes minces.

2. ETUDES DE BARRAGES. La recherche dans le domaine des barrages en béton s'est poursuivie en des champs différents. En premier lieu, dans l'étude des roches de fondation, visant la connaissance de leur structure géologique, leurs propriétés mécaniques, leur perméabilité, leur altération et la possibilité de leur traitement et amélioration. On a développé de nouvelles méthodes et théories pour l'étude des roches, entre autres celles de la géophysique et de la mécanique des roches. Les essais "in situ" pour la détermination de la déformabilité (Fig.I) et de la résistance au cisaillement (Fig.II) sont à présent considérés indispensables pour le projet d'un barrage en béton et évaluation de la sécurité de la structure et de ses fondations (Ref. 1 et 2).

Un autre domaine où la recherche tient un rôle important est celui de la définition des forces auxquelles les barrages sont soumis. La pression hydrostatique est facile à définir, tandis que les variations de la température à l'intérieur du béton (Ref.3), la sous-pression (Ref.4) et les actions séismiques (Ref.5) posent beaucoup de problèmes auxquels il faut apporter une solution si l'on veut projeter un barrage en conditions de complète sécurité. De même le poids propre qui augmente au fur et à mesure que l'ouvrage grandit, peut produire un complexe d'efforts qu'il faut étudier (Ref.6).

L'effet de ces forces sur le barrage et ses fondations peut être l'objet de calculs par voie analytique, dont la complexité est bien connue et qui aujourd'hui ont recours aux calculatrices électroniques (Ref.7).

Toutefois, la recherche sur les états de contrainte, vu leur complexité, n'a pu aboutir que moyennant l'essai sur modèles obéissant aux lois de la similitude mécanique, en employant des techniques appropriées (Ref.8).

Au Portugal, l'étude structurale des barrages par rapport à la pression hydrostatique et au poids propre est faite systématiquement par des essais sur modèle (Ref.9), soit en régime élastique (Fig.III), soit jusqu'à la rupture (Fig.III), ce qui revient à déterminer avec sens physique, le coefficient de sécurité global de ces structures (Ref.9). Des recherches en cours actuellement offrent aussi la possibilité de déterminer les effets des variations thermiques (Ref.11) et de séismes (Ref.12) sur les barrages en béton à partir d'essais sur modèles.

Encore un domaine important du travail expérimental et d'investigation est celui de l'observation des barrages. Cette activité se justifie d'un côté par le besoin de posséder un contrôle permanent de la sécurité de ces ouvrages; par ailleurs, c'est l'observation de la nature qui peut donner une idée exacte des problèmes réels à étudier. L'observation des ouvrages (Ref.13) consiste, en général, dans la mesure de déplacements par des méthodes de géodésie (Ref.14) ou par des appareils installés à l'intérieur, tels que des pendules et des clinomètres; elle consiste aussi dans la mesure d'extensions (Fig.V) et contraintes (Ref.14), de températures, ouverture de joints, pression intersticielle, etc. On peut dégager de nombreux enseignements de l'analyse des résultats de l'observation de barrages, particulièrement si on peut séparer les effets des différentes forces (Ref.16).

3. BARRAGES A VOUTE UNIQUE. Au cas où les vallées ne soient pas très larges, on peut avoir recours, avec économie et sécurité, aux barrages à voûte unique.

On peut dire que le barrage voûte est le type le plus sûr d'ouvrage de retenue d'eau, son coefficient de sécurité (Ref.10) s'élévant souvent au-dessus de 10. Cette solution permet des dispositions économiques et élégantes pour la dérivation provisoire, les ouvrages de vidange et les évacuateurs de crues.

En effet, si le rapport entre la largeur et la hauteur de la vallée n'excède pas 5 ou même 7 et si les fondations sont favorables, bien qu'elles ne soient pas de rocher de bonne qualité, le barrage à voûte unique peut apporter une économie en béton qui va jusqu'à 50% ou 75% par rapport au barrage poids, pourvu qu'on réussisse à utiliser toute la résistance à la compression du béton, c'est-à-dire, pourvu qu'on donne au barrage les formes les plus adéquates.

La forme la plus intuitive et donc la plus simple et traditionnelle, est constituée par un parement cylindrique et vertical à l'amont et un parement conique à l'aval, les arcs étant circulaires en plan. Cette solution présente, toutefois, l'inconvénient de ne pas se servir au mieux du poids propre, dans le sens d'éliminer les contraintes de traction dues à la pression hydrostatique.

La critique que ces formes traditionnelles ont subi par suite des résultats des calculs et des essais sur modèle, a conduit à un tracé des barrages voûtes avec courbure dans la verticale et diminution des rayons à la partie inférieure. Les études les plus récentes ont démontré l'avantage qu'il y a à augmenter la courbure verticale et encore à diminuer la courbure des arcs à mesure qu'approchent leurs naissances, car de ce fait, on donne à l'ouvrage des formes prochaines de la surface anti-funiculaire des charges. Ceci revient à obtenir des formes où les compressions sont presque égales en tout le volume du béton (Fig.VI), ce qui correspond à l'utilisation la plus économique de ces matériaux.

Un tracé évolué du barrage-voûte est celui de l'arc de trois centres avec courbures variables dans les verticales. Ce type de tracé (Fig.VII) permet d'obtenir des structures de toute svelteese (Fig. VIII) et parfaitement adaptées aux fondations, même lorsque leur qualité est mauvaise. En effet, avec ce type de tracé, on peut obtenir des incidences appropriées dans les fondations, c'est-à-dire, des angles au centre très petits (Ref.12). Ces formes sont définies par des équations dans le projet, ce qui est très convénient pour la précision de l'emplacement des coffrages et ainsi que pour l'aspect final de l'ouvrage.

Lorsque la vallée est très large et le barrage n'est pas élevé, c'est très difficile ou même impossible d'utiliser toute la capacité de résistance à la compression du béton et d'éviter les contraintes de traction seulement par le jeu des formes du barrage. D'où, l'idée récente de provoquer un état de contrainte initiale opposée à lapression hydrostatique, c'est-à-dire, soumettre le barrage à une précontrainte horizontale, susceptible de produire des compressions au pied amont et aussi à la partie supérieure de la voûte, à l'aval. A cet effet, on installe dans quelques joints du barrage des vérins plats, type Freyssinet, qui soient capables d'ouvrir ces joints et ainsi opérer un déplacement de la structure vers l'amont; on place aussi un ou plusieurs câbles à la partie supérieure du barrage qui puissent la déplacer vers l'aval (Fig. IX et X). Cette méthode de mise en précontrainte a le grand avantage d'offrir une meilleure marge de sécurité au barrage, tout en améliorant les conditions de stabilité de ses culées.

Dans le projet traditionnel des barrages, les joints de construction et ceux de bétonnage dont des détails des plus importants au point de vue technique et de coût de la construction. Cependant, l'observation des barrages-voûtes de double courbure, montre que les joints n'ouvrent pas dans la région centrale, après la construction. D'où l'on conclut qu'on peut dispenser les joints dans la région centrale de ces barrages, les laissant seulement dans les culées et près de la fondation (Fig. VII, IX et X). On considère que ce type de construction peut représenter une économie substantielle par rapport au projet typique de barrage construit en blocs.

4. BARRAGES A VOUTES MULTIPLES. Lorsque les vallées sont très larges, par ailleurs le barrage poids on a fait usage d'autres types de barrages en béton, tels que les barrages à contreforts indépendants, de tête massive, simples ou jumelés, et les voûtes multiples cylindriques.

Les contreforts indépendants ne représentent pas une économie très remarquable en face du barrage poids, constituant des structures qui ne se servent pas de la troisième dimension, car elles ne résistent que dans le plan vertical. En ce qui concerne les voûtes multiples employées jusqu'à présent, leur forme traditionnelle est la voûte cylindrique mince, très inclinée et dont la portée va de 1/5 jusqu'à

la moitié de la hauteur, au maximum. Ceux de ces barrages où la portée est plus petite, exigent l'installation d'une armature importante; d'un autre côté, les épaisseurs trop faibles entraînent des difficultés et ainsi la majoration du coût unitaire de la construction.

Ayant en vue les avantages des épaisseurs de construction plus grands, disons supérieures à 1 m ou 1,5 m, on a étudié à partir de membranes (Ref.17) et ensuite sur modèles (Fig.XI) des barrages à voûtes multiples, avec double courbure et grande portée qui peuvent rendre la construction très économique.

Ces formes sont facilement adaptables à des vallées de toute configuration, en pouvant faire varier la portée des voûtes ou, au cas où la géologie le conseille, combiner ce type de barrage avec des barrages latéraux en terre (Fig.XII). Ainsi on obtient des solutions très intéressantes.

En général, le problème le plus délicat posé par ces barrages est celui du dimensionnement des contreforts. Les modèles, toutefois, constituent la méthode la plus sûre pour ce dimensionnement et pour étudier des problèmes concernant la différente rigidité de la fondation et du béton, etc. Quand la qualité des fondations est mauvaise, on peut employer avec avantage la mise en précontrainte des contreforts.

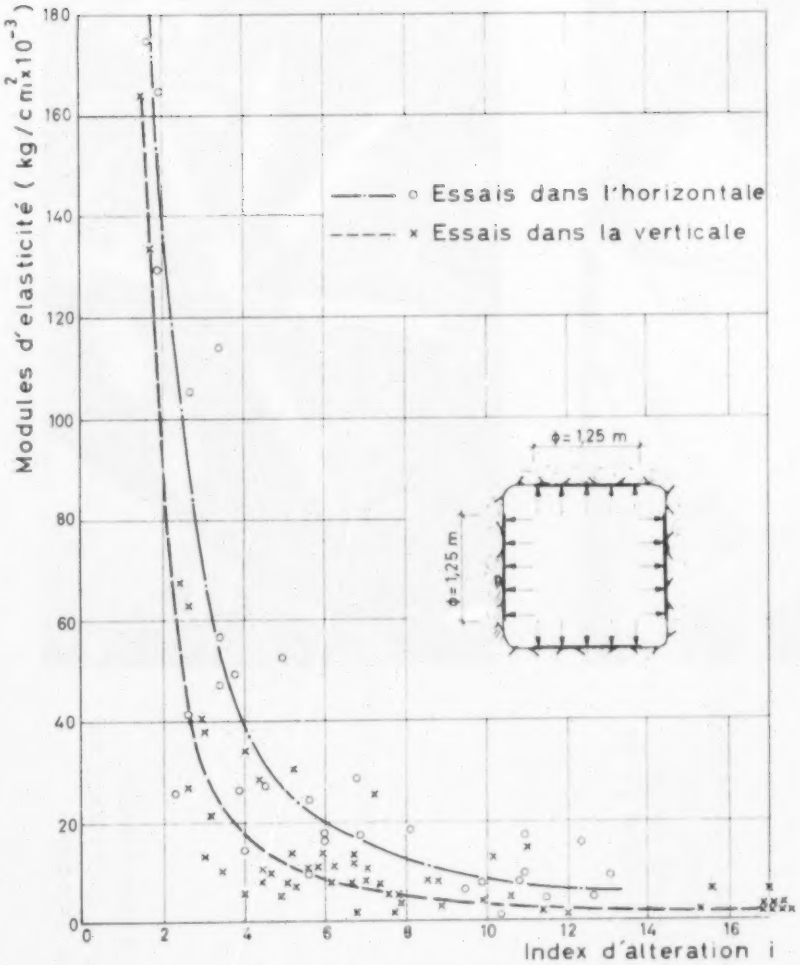

FIG I RAPPORT ENTRE LES MODULES D'ELASTICITÉ OBTENUS "IN SITU" SUR DES ROCHES GRANITIQUES ET LES INDEX D'ALTERATION

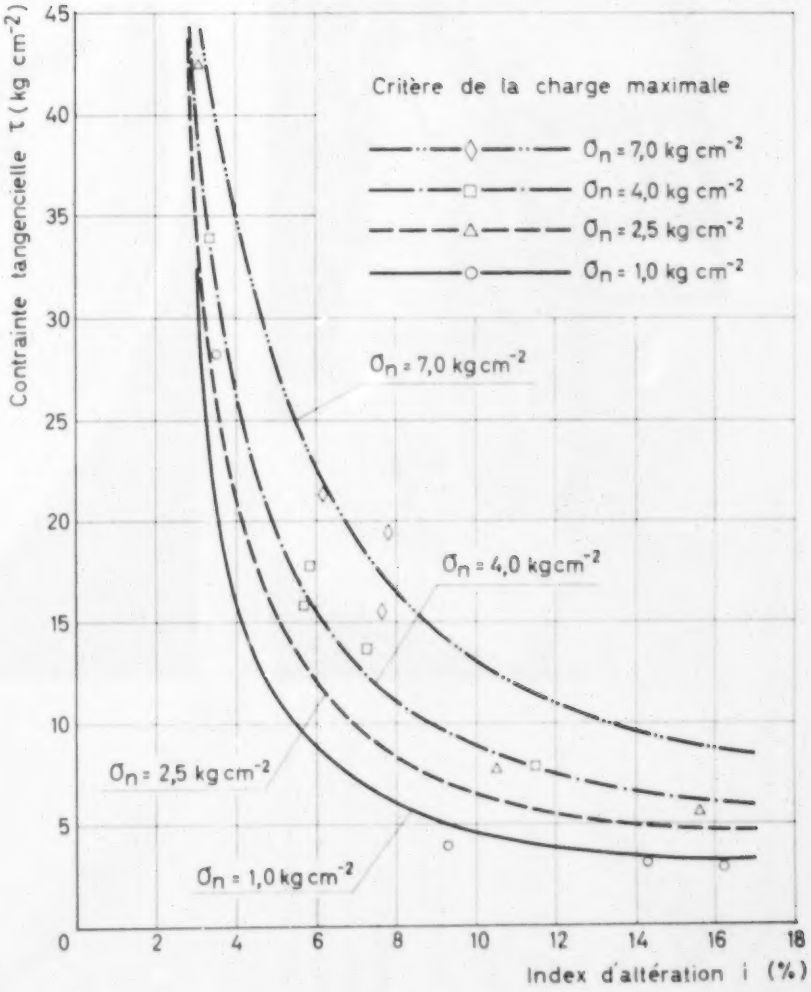
Contrainte tangencielle τ (kg cm⁻²)
Index d'altération i (%)
Critère de la charge maximale
σn = 7,0 kg cm⁻²
σn = 4,0 kg cm⁻²
σn = 2,5 kg cm⁻²
σn = 1,0 kg cm⁻²
σn = 7,0 kg cm⁻²
σn = 4,0 kg cm⁻²
σn = 2,5 kg cm⁻²
σn = 1,0 kg cm⁻²

FIG II – RESULTATS DES ESSAIS DE CISAILLEMENT "IN SITU" DES GRANITS

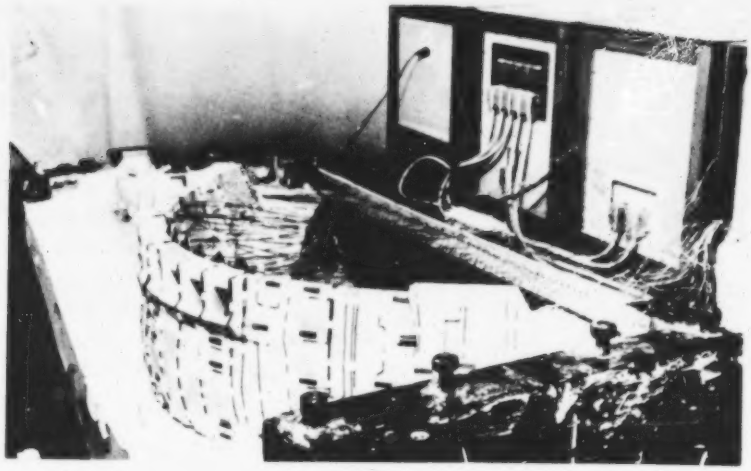

Fig. III
Essai sur modèle de l'action de la pression hydrostatique dans un grand barrage voûte avec déversoir à ouvertures

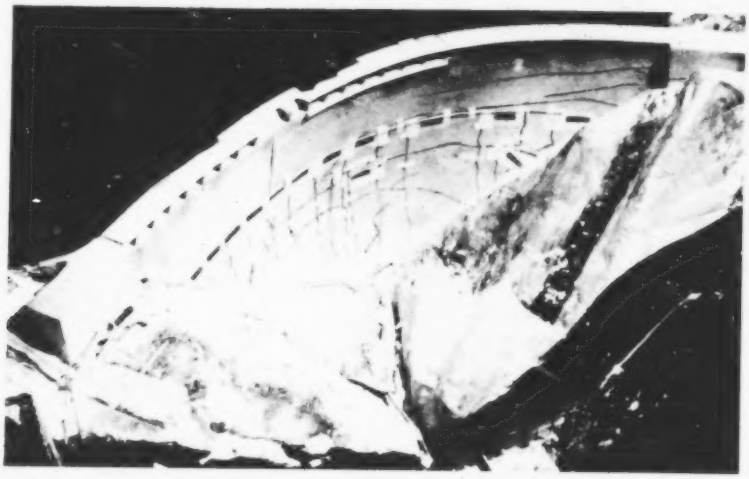

Fig. IV
Essai d'un modèle d'un barrage voûte jusqu'à rupture par l'action simultanée de la pression hydrostatique et du poids propre

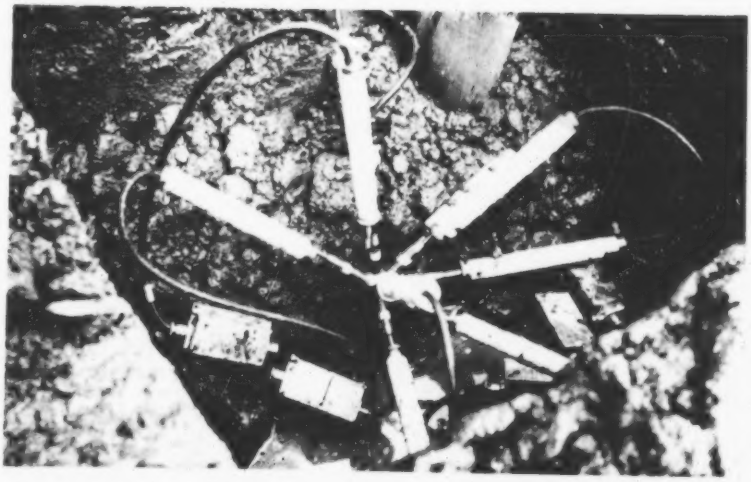

Fig. V
Installation d'une étoile d'extensomètres à l'intérieur du béton d'un barrage

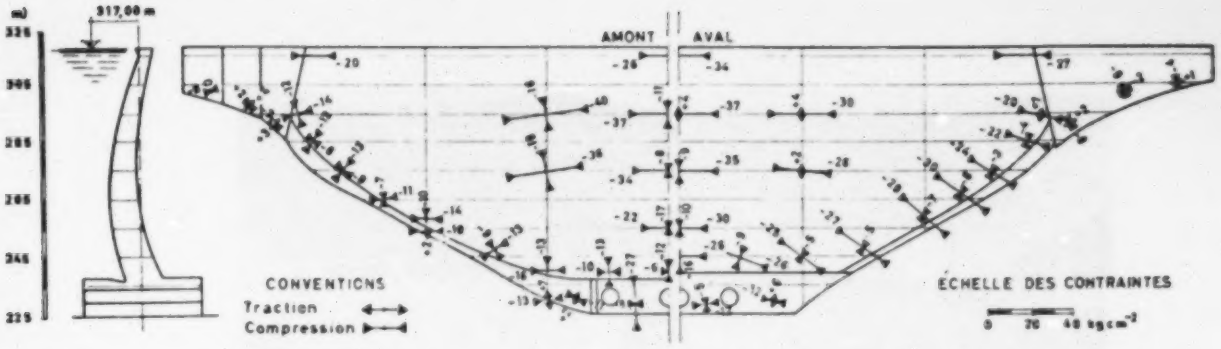

Fig. VI - Contraintes principales dans une voûte dues à l'action simultanée du poids propre et de la pression hydrostatique. Noter l'équilibre général des contraintes.

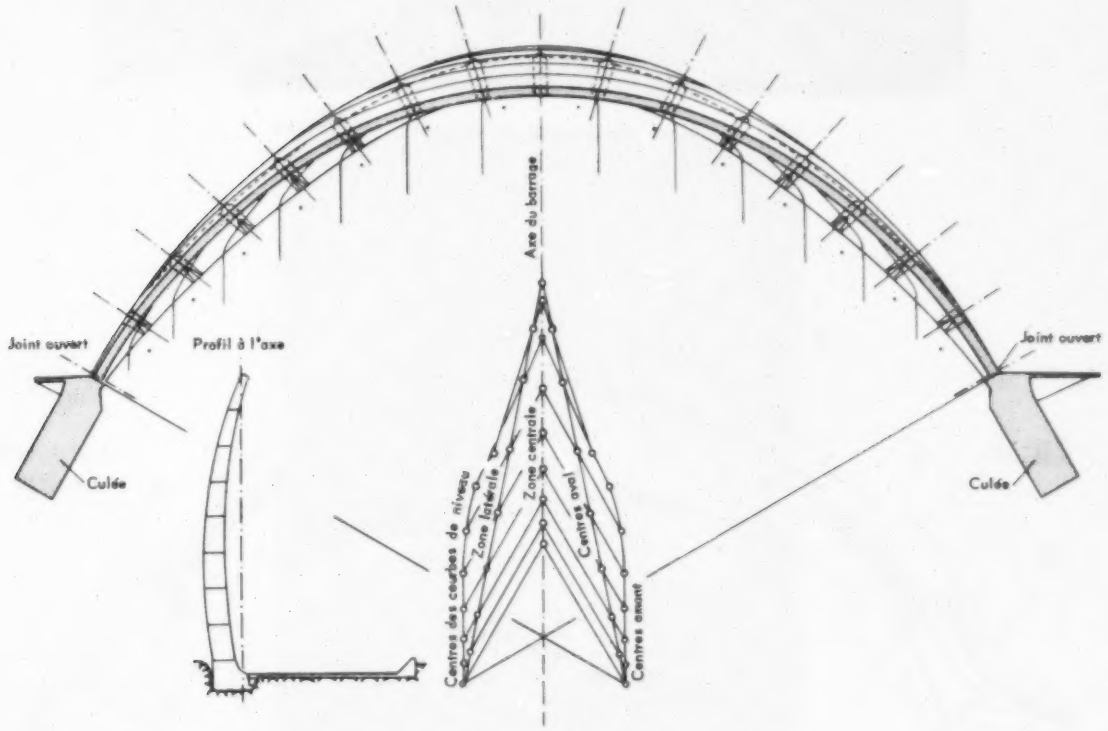

Fig. VII - Barrage route mince à courbure variable

Fig. VIII - Barrage voûte à 3 centres

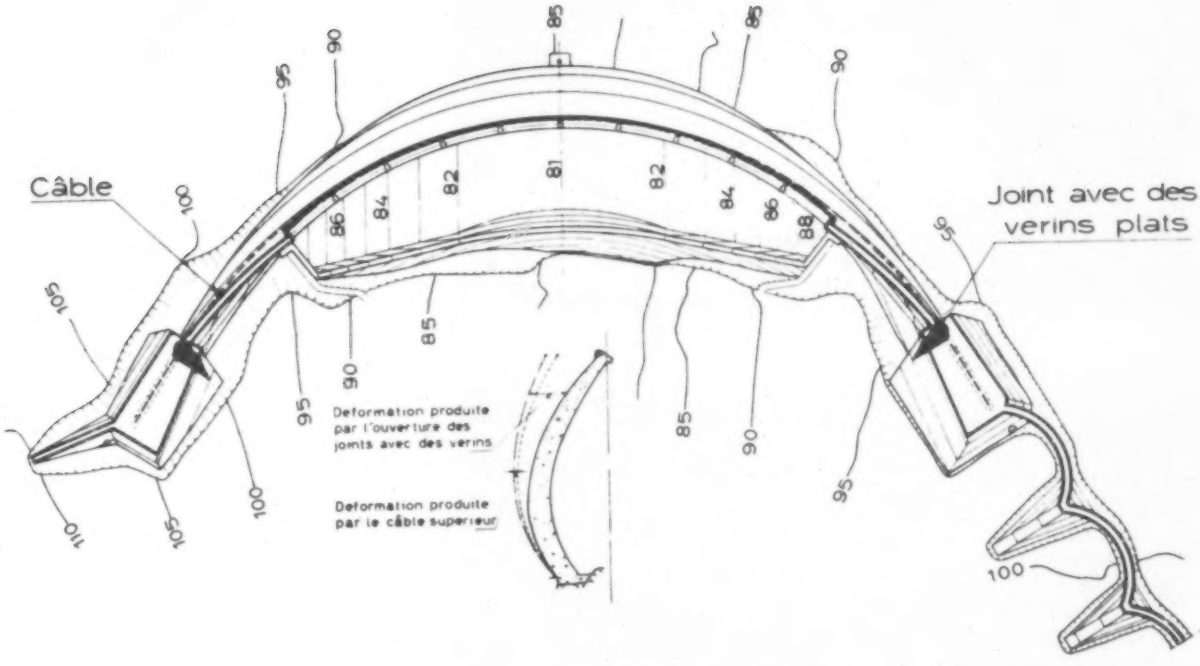
Câble
Joint avec des verins plats
Deformation produite par l'ouverture des joints avec des vérins
Deformation produite par le câble superieur

Fig. IX - Barrage voûte pour large vallée avec precontrainte horizontale

Fig. X - Distribution des joints dans un barrage voûte mince avec précontrainte horizontale

Fig. XI - Modèle d'un barrage à voûtes multiples de grande portée

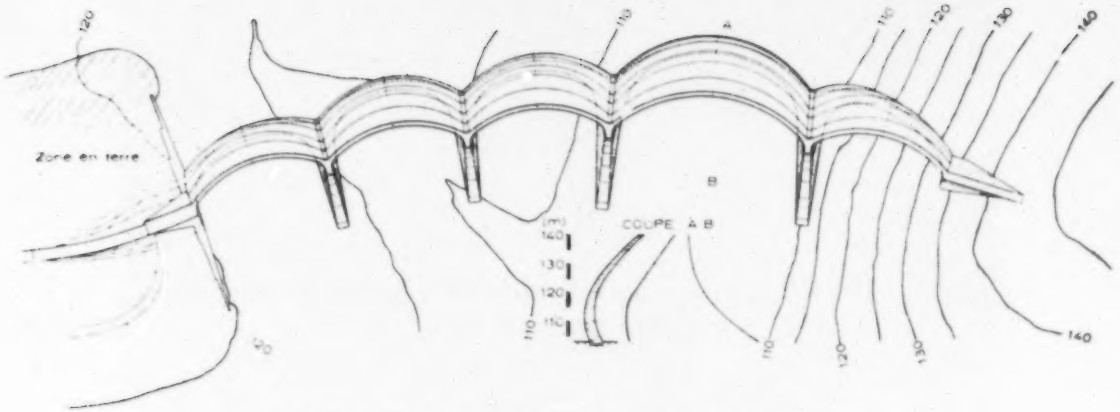

Fig. XII - Solution en voûtes multiples pour très large vallée

856 F - Oct. 1962 - 1,000